

# Diseño de un controlador para sistemas de cultivos hidropónicos con ajuste automático de nivel de solución

Juan Beermann, Kadir González Dávila,  
Rick Mark Morales, Deyka García

Universidad Tecnológica de Panamá

[juan.beermann20@hotmail.com](mailto:juan.beermann20@hotmail.com), [kadir.dav@hotmail.com](mailto:kadir.dav@hotmail.com),  
[mark03@hotmail.com](mailto:mark03@hotmail.com), [deyka.garcia@utp.ac.pa](mailto:deyka.garcia@utp.ac.pa)

**Resumen:** La agricultura hidropónica emplea una metodología para cultivar plantas en un medio formado por agua y minerales en lugar de suelo. Sin embargo, el uso de un sistema para suplir las necesidades de agua y nutrientes de las plantas eficientemente es imprescindible para que la misma sea económicamente aceptable. En este artículo se desarrolla un prototipo de sistemas de cultivo hidropónico automatizado, para mantener el nivel requerido de la solución nutritiva, así como controlar y monitorear los plántones cultivados. El prototipo propuesto capta mediante una cámara en tiempo real, el crecimiento de los cultivos a partir de información visual directa con la finalidad de evaluar y optimizar los recursos requeridos.

**Palabras claves:** controlador, hidropónico, nivel, reconocimiento de imagen.

**Title:** Controller design for hydroponic systems with automatic solution level

**Abstract:** Hydroponic agriculture employs a methodology for growing plants in a medium consisting of water and minerals instead of soil. However, the use of a system to meet the needs of water and nutrients efficiently is essential so that it is economically acceptable. This paper presents a prototype of automated hydroponics systems developed to maintain the required level of the nutrient solution, as well as control and monitor the seedlings grown. The proposed prototype uses a camera, in real time, to capture the growth of crops with direct visual information in order to evaluate and optimize the resources required.

**Key words:** driver, hydroponic, level, image recognition.

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2015

Fecha de aceptación: 3 de diciembre de 2015

## 1. Introducción

En la actualidad, los problemas relacionados al cultivo de grandes extensiones de terreno ha llevado a la degradación de

los suelos principalmente a alcalinidad alta, salinidad, erosión y falta de nutrientes, provocando que se utilicen abonos y otras técnicas que a la postre van a ocasionar un impacto negativo en el ambiente. Aunado a esto, el cambio climático ha ocasionado grandes pérdidas en este ámbito y muchos productores han percibido el déficit económico que las sequías han provocado, tal y como sucede actualmente en el área de Azuero en nuestro país [1].

En base a esto, la ciencia ha buscado otras alternativas para minimizar tal impacto y mejorar el uso del agua, surgiendo así la técnica de la hidroponía como solución al cultivo de alimentos sin la necesidad de suelos, a partir de la provisión de los nutrientes esenciales de crecimiento de las plantas en una solución acuosa óptima [2], [3].

Un aspecto a evaluar en este sistema de cultivo es el nivel de solución aplicada a las plantas, ya que se debe poseer una relación lo suficientemente precisa entre la longitud de las raíces, de los cultivos y la altura de la solución para evitar el posible marchitamiento o, en peores circunstancias, atraer enfermedades al cultivo [3], [4].

En este apartado se enfoca la manera eficaz de mantener el nivel de solución mediante un controlador que con la ayuda del reconocimiento de imagen, pueda establecer la altura ideal de la solución, tratando de mantener un buen flujo que garantice en parte una buena oxigenación y una concentración uniforme de la solución.

## 2. Diseño del Sistema hidropónico

Uno de los aspectos más importantes a controlar resulta ser el nivel de solución en el tanque hidropónico, ya que si se tiene mal nivelación de las plantas, éstas podrían quedar sin los sustratos adecuados para su desarrollo, o caso contrario, tener un exceso de sustrato que representa pérdida para el sistema y peligro en la producción [1].

Para tener una idea de cómo se elaboraría una canaleta para cultivo hidropónico, se supondrá en nuestro caso, una parcela de dimensiones rectangulares con 9.6 m de longitud, 1.2 m de ancho y 0.2 m de altura como se aprecia en la Figura 1. Esto es debido a que el cultivo tomado en cuenta en el estudio son los tomates (cultivos que tienen un gran crecimiento) [5], [6].

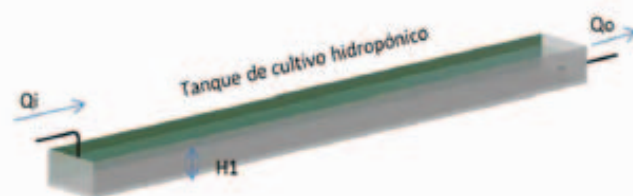


Figura 1. Prototipo del tanque para el control de nivel.

A continuación aparece en la Figura 2 una vista frontal del sistema presentando la presencia del sensor de presión, la cámara fotográfica y la válvula de flujo variable considerando a su vez la posible posición de los mismos en la parcela o canaleta de cultivo hidropónico.

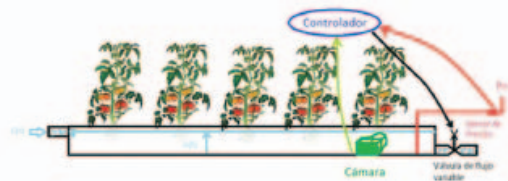


Figura 2. Parcela de cultivo hidropónico.

En cuanto al tipo de sensor que se considera en este artículo, es de tipo de presión diferencial con la atmósfera y se escogió debido a que es el que más preciso al relacionar la variable de altura con la de presión en forma proporcional, [7]. Un ejemplo de este sensor se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3. Sensor de presión diferencial.

El actuador para esta aplicación es la electroválvula de flujo variable cuya ilustración aparece en la Figura 4. El controlador, mediante las respectivas leyes de control, logra manipular el flujo a través de la válvula de flujo variable a la salida de la canaleta ya que se supone que el flujo a la entrada será un valor constante mediante un orificio pequeño hacia la canaleta con la opción que sea aplicada en forma de tipo riego por goteo directamente hacia las plantas. Cabe señalar que esta opción puede no ser tan beneficiosa con respecto a la aireación de la mezcla, [8]. Detalles de este estudio no están contemplados en este artículo.



Figura 4. Válvula de flujo variable.

### 3. Fusión de imágenes en el dominio de multiresolución

El sistema consiste en un tanque, en el cual se contiene

el cultivo hidropónico y se representa mediante la función de transferencia para el sistema de primer orden. Al ser un sistema de recirculación y contar con el controlador para nivel podemos despreciar las pérdidas por evapotranspiración [9].

Por otra parte, el dispositivo a sensor el nivel de líquido se escogió como un sensor de presión, ya que éste es menos propenso a variaciones de ondas de agua. Este sensor capta el nivel de la mezcla al relacionarlo con la presión atmosférica, la presión en el fondo de la columna de líquido, la densidad del fluido y el valor de la gravedad, recordando la siguiente fórmula [5].

$$P = \rho gh \quad (1)$$

#### 3.1 Sistema de nivel Tanque

El caudal dentro de las válvulas en general está regido por una constante de carga llamada  $k_v$  la cual depende del tamaño de la entrada y salida de la válvula y la altura de operación del tanque [10].

$$q = k_v \sqrt{h} \quad (2)$$

Para analizar el balance de masa en el tanque hidropónico se utiliza la ecuación de continuidad en términos de la válvula y el flujo consumido a lo largo del tramo del tanque.

$$q_i(t) = q_1(t) + q_0(t) + q_{PLANTA} \quad (3)$$

Cabe mencionar que la variación del flujo de las plantas con respecto al tiempo es insignificante.

De acuerdo a la tasa de cambio de volúmenes, relacionado con la variación de altura.

$$q(t) = A \frac{dh_1}{dt} + \frac{k_v}{2\sqrt{h_{1s}}} (h_1) \quad (4)$$

donde  $A$  representa el área transversal del tanque [ $m^2$ ],  $h_1$  es la altura del agua en el tanque [ $m$ ],  $k_v$  es la constante de la válvula [ $m^3/h$ ]. Aplicando la transformada de Laplace y haciendo reemplazo de diversas variables, se obtiene:

$$k_2 Q_i(s) = sH(s) + k_1 H(s) \quad (5)$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_2}{(s + k_1)} \quad (6)$$

El término de la altura en el radical ( $h_1s$ ) de (4) corresponde al valor del punto de referencia al cual el sistema estará cambiando de acuerdo al crecimiento de las raíces y que resulta de la captación de imágenes mediante la cámara, análisis que se contemplará en un punto posterior. De igual forma, se contempla que matemáticamente se tomará la presencia del sensor con una función de transferencia igual a la unidad, como se aprecia en la Figura 5, donde  $Q(s)$  es la entrada y  $h(s)$  es la salida del sistema. El mismo es suficiente para modelar el efecto de la rapidez con la que el sensor retroalimenta el sistema de

control, suponiendo que no hay pérdidas de información y el canal de transmisión es el adecuado.

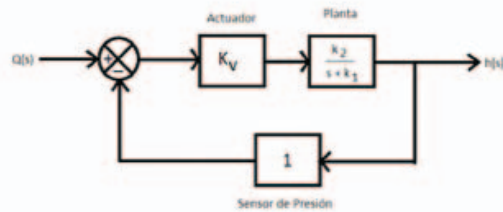


Figura 5. Lazo de control.

### 3.2 Modelado del sistema sin controlador

El *software* de Matlab nos proporciona resultados de análisis de estabilidad de diversas formas mediante el programa principal en ambiente simulink/sisotool. El siguiente algoritmo brinda el resultado del sistema estudiado sin compensar. Los resultados de este análisis pueden ser contemplados en resultados y discusiones.

Al observar el resultado de este sistema, se nota que el mismo es estable aunque tiene una pobre ganancia con respecto a la entrada escalón unitario, además se aprecia que el mismo puede llegar a tener un mejor tiempo de asentamiento y esto se puede lograr utilizando controladores que proporcionen una mejor ganancia y estabilización rápida.

### 3.3 Modelado del sistema con controlador

Como se explicó en el sub punto anterior, la presencia de un controlador logra mejorar notablemente los parámetros de tiempo de asentamiento y ganancia, situación que se muestra con la aplicación de controladores P y PD, tomando en cuenta que si se agrega el factor integral para obtener un controlador PI o PID, se introducen oscilaciones lo que conlleva a la inestabilidad del sistema situación que no deseada. Se varían los parámetros de las constantes proporcional y derivativa, e incluso se ajusta el mejor valor, utilizando diferentes técnicas.

## 4. Definición del punto de referencia mediante reconocimiento de imágenes con cámara

Con la finalidad de complementar el controlador y cumplir con la necesidad de variar el nivel de la solución a medida que las raíces de las plantas crecen, se utiliza un sistema básico y muy económico de reconocimiento de imagen, que nos permitirá obtener la señal de entrada para nuestro sistema. Este proceso cuenta con tres etapas fundamentales que son la captación de imagen, el análisis para la obtención del nivel requerido y el envío del valor de referencia [11].

### 4.1 Captación de imagen

La captación de imagen consiste en tomar una foto utilizando una *webcam* ubicada siempre a la misma distancia del tanque para mantener la escala. El lado que estará detrás de las raíces

debe ser de color blanco preferiblemente para lograr el contraste adecuado al momento de realizar nuestro análisis digitalmente.

Por medio del algoritmo creado, se envía la orden cada cierto tiempo para que la cámara tome una foto del tanque y se pase directamente al entorno de Matlab, ilustrado en la Figura 6. El tiempo aproximado podría variar en días, semanas o hasta meses dependiendo del tiempo de crecimiento del cultivo seleccionado.

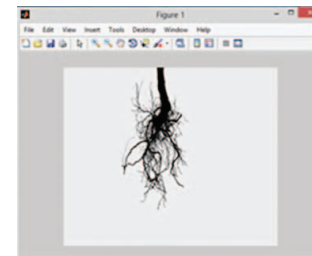


Figura 6. Captación y conversión de la imagen a escala de grises.

### 4.2 Análisis para la obtención del nivel requerido

Luego de tener la imagen lista, se debe pasar a escala de grises para poder aplicar la lógica de obtener una distancia mediante el cambio de color en los pixeles y la escala real (barrido) como se aprecia en la Figura 7.

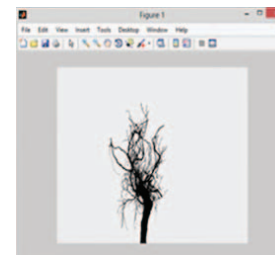


Figura 7. Volteado de imagen para realizar proceso de barrido.

Debido a que Matlab tiene un comienzo de barrido donde su coordenada número uno está en la parte superior izquierda, se debe invertir la imagen para que se logre aplicar la lógica deseada en donde las distancias serán obtenidas al realizar el barrido desde el fondo del tanque hasta encontrar las raíces que serían el cambio de pixelado [11].

La distancia desde el fondo del tanque al final de la raíz de referencia será obtenida de forma instantánea. Con esta información se puede realizar una proporción promedio que nos dirá cuál debe ser el nivel de líquido.

### 4.3 Envío de la señal de referencia

Adicionalmente, el algoritmo de matlab permite realizar la transmisión del valor obtenido como señal de entrada *setpoint* hacia el programa donde se encuentre nuestro controlador. Para facilitar esta transmisión se recurre a un comando sencillo que permite enviar datos a cualquier dispositivo que tenga un puerto serial. De esta forma, la información de la proporción

que debe guardar el nivel con respecto a las raíces se guardará automáticamente hacia el valor de  $h_1$  de (4) que muestra la altura como una constante en el lapso de tiempo que dure el control de la altura deseada.

## 5. Resultados y discusiones

Los cultivos hidropónicos nos ayudan a mantener un desarrollo sostenible acorde con las demandas actuales por ello la importancia de presentar a continuación un análisis del control que mantendrá el nivel requerido de la solución nutritiva con mejor desempeño.

### 5.1 Controlabilidad sin compensador

Con los comandos antes vistos y luego de colocar sus respectivos valores a cada una de las constantes, se obtiene fácilmente la ecuación final de transferencia y el número de condición de controlabilidad para tener una mejor idea de que tanto el sistema es controlable o no. De acuerdo a lo hecho anteriormente sobre la estabilidad del sistema se observa que el comportamiento sin un controlador ni compensador, presenta una respuesta lenta.

### 5.2 Compensadores de tipo P y PD

Con una resultado estable como éste, se busca acelerar la respuesta del sistema por lo cual se utilizan compensadores P y PD para que nuestro sistema sea más estable y confiable.

Se agrega una ganancia en el caso de un compensador proporcional o un polo en el caso de un compensador proporcional derivativo haciendo que el sistema sea más estable y tenga mejor respuesta, aumentando la estabilidad a la unidad, [12].

La idea principal es compensar adecuadamente de modo tal que la respuesta a lazo cerrado se corresponda con la deseada para obtener una mejor sintonía.

En la Figura 8 se observa el diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado compensado y sin compensar.

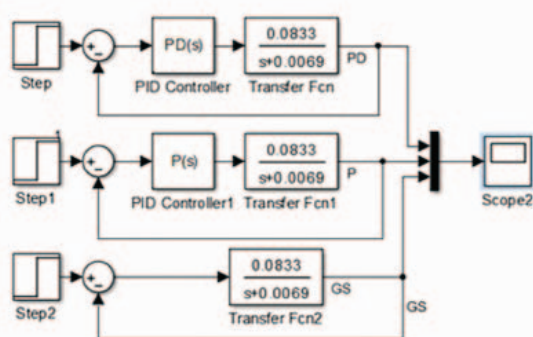


Figura 8. Diagrama de control para el análisis del controlador.

En la Figura 9, se muestra la implementación llevada a cabo para comparar la respuesta de los sistemas sin compensar y con controladores de tipo P y PD.

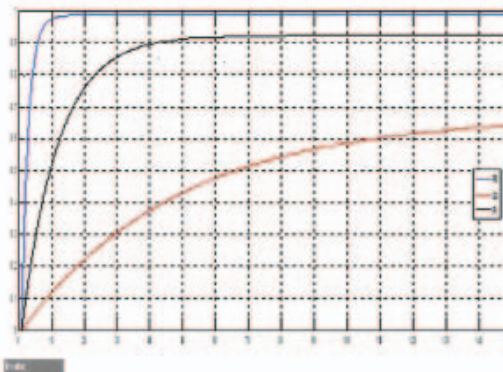


Figura 9. Comparación de los diferentes compensadores.

Mediante la liberalización proporcionada por la herramienta de sisotool para analizar la estabilidad de un sistema y su respuesta, se obtiene que para un controlador PD una constante proporcional de 5,87 con una constante derivativa de 0,008. De igual forma, la herramienta arroja para el mejor controlador proporcional una constante proporcional de 0,1691 y para el caso sin controlador se aprecia que su comportamiento es mucho más lento que el de los anteriores.

## 6. Conclusiones

- Se ha modelado satisfactoriamente un prototipo de sistemas de cultivo hidropónico, obteniendo experimentalmente todas las constantes asociadas a los modelos, utilizando para ello el ambiente Matlab.
- Se logra implementar el reconocimiento de imágenes, mediante fotografía, para el diseño del controlador con la finalidad de optimizar la mezcla necesaria para la producción de estos cultivos.
- Mediante el análisis de los resultados se verifica que la eficiencia del sistema controlado versus uno que realice el procedimiento de forma manual se logra mejorar hasta en un 40 %, obteniendo un ahorro significativo tanto en sustratos como en agua.
- Esta implementación permite tener datos precisos y confiables que ayudan a minimizar el tiempo de producción y las pérdidas en los cultivos, debido a que el sistema propuesto no corre el riesgo de inundarse o de dejar al cultivo sin los nutrientes.

## Referencias

- [1] R. C. Ortiz. Automatización de un Sistema de riego para cultivo de jitomate mediante método de camas de hidroponía en invernadero. Tesina; IPN, México D.F., 2011.
- [2] P. F. Martínez, D. R. y R. Belda. El control del fertirriego en los cultivo sin suelo. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias Departamento de Horticultura, Valencia, 2010.
- [3] (2014) Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ. [Online], Disponible en [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jarq/48/1/48\\_71/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jarq/48/1/48_71/_article)



- [4] (2004) Universidad de Talca website. [Online], Disponible en <http://dspace.utalca.cl/handle/1950/2931>
- [5] D. S. Benítez. Diseño y construcción de un sistema de nivel de líquidos. Tesis; EPN, Quito Ecuador, 1994.
- [6] (2013) Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; Hidroponía Rústica, Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. <http://www.gob.mx/sagarpa#documentos>. Consultado el [07.2014]
- [7] Información de catálogo para el sensor de presión diferencial. [Online]. Disponible en: [http://sensing.honeywell.com/product-page?pr\\_id=6449](http://sensing.honeywell.com/product-page?pr_id=6449) Consultado el [21.05.2015]
- [8] Información de catálogo para la válvula de flujo variable [Online]. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/eaton-hydraulics/valvulas-regulacion-caudal-hidraulicas-7323-616970.html>
- [9] E. Franco, C. Pinedo y F. Pérez. "Control Gain Scheduling de dos tanques en Cascada; Universidad del Valle. [Online], Disponible en <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1292/6/Control%20por%20Gain%20Scheduling%20de%20Dos%20Tanques%20en%20Cascada.pdf>
- [10] A. Creus, Instrumentación Industrial, Octava Edición, Editorial Alfa-omega S.A. México, 2010.
- [11] D. García P., Manejo Básico de Imágenes con Matlab; Disponible [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/14/Manejo%20basico%20de%20imagenes\\_matlab.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/14/Manejo%20basico%20de%20imagenes_matlab.pdf)
- [12] (2007) E. González y M. Garavito; Diseño de un controlador PID análogo para un circuito RC de segundo orden mediante la Sissotool de Matlab; Disponible [http://de.mathworks.com/matlabcentral/ftp\\_files/15529/1/doc.pdf](http://de.mathworks.com/matlabcentral/ftp_files/15529/1/doc.pdf)
- [13] (2009) E. J. Castilblanco y J. A. Hidalgo. Efecto de dos tratamientos de agua en la producción de lechuga (Lactuca sativa) bajo dos sistemas hidropónicos en piscicultura. Disponible <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/420/1/T2871.pdf>